

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ACOPLE EFICIENTE Y DE BAJO DAÑO MECÁNICO PARA LOS VIBRADORES INERCIALES DEL TALLO DEL CAFETO

Federico García Uribe*; Carlos Eugenio Oliveros Tascón**; Fernando Álvarez Mejía***; Iván Darío Aristizábal Torres****;

RESUMEN

GARCÍA U., F.; OLIVEROS T., C.E.; ÁLVAREZ M., F.; ARISTIZÁBAL T., I.D. Desarrollo de un sistema de acople eficiente y de bajo daño mecánico para los vibradores inerciales del tallo del cafeto. Cenicafé 54(2):97-109. 2003.

En estudios realizados en Cenicafé se observó que es posible desprender más del 60% de los frutos maduros de café con menos del 10% de frutos inmaduros en la masa cosechada en menos de 15 segundos, un 6,3% del tiempo requerido por un recolector en la cosecha manual tradicional. Esta investigación generó la información necesaria para el diseño y operación de sistemas de acople para vibradores de tronco que transmitan eficientemente la vibración y también eviten el daño mecánico en la corteza del árbol del café. La investigación fue dividida en dos partes: En la primera parte en el laboratorio se determinó el esfuerzo radial admisible [$\sigma_{R\text{Adm.}}$] para la corteza del café para árboles de tres edades de (48, 60 y 72 meses) usando una máquina universal para deformaciones controladas de materiales y estudios histológicos. La segunda parte consistió en la medición de la transmisión de la vibración del sistema de acople utilizando acelerómetros, hardware y software para adquirir y procesar las señales de la vibración. Para evaluar el daño en los tejidos en condiciones normales de operación se usaron películas sensibles a la presión, desarrolladas por S.P.I. Inc., para conocer la presión ejercida y la distribución en la corteza del árbol de café. El esfuerzo radial admisible [$\sigma_{R\text{adm}}$] para las edades consideradas fue de 2068,2 kPa (300 psi), el daño mecánico visible y en los tejidos fue 0% y la transmisión de la vibración del sistema de acople desarrollado fue superior al 80%.

Palabras Claves: Café *Coffea arabica*, cosecha mecánica, vibradores inerciales de tallo, sistema de acople, daño mecánico, transmisión de la vibración.

ABSTRACT

In studies carried out at Cenicafé, it was observed that it is possible to detach more than 60% of ripe coffee berries with less than 10% immature coffee berries in the harvested mass in less than 15 s, that represents 6,3% of the time required by a picker in the traditional manual harvesting. This research has generated the necessary information for the design and operation of trunk shaker-clamp systems to efficiently transmit the vibration and yet avoid the mechanical damage in the coffee tree bark. The research was divided into two parts. In the first one, in the laboratory, the admissible radial stress [$\sigma_{R\text{Adm.}}$] of the coffee bark for three ages of trees (48, 60 and 72 months), using a universal machine for controlled deformation and by means of histology studies (at the tissue level) was determined. The second part consisted of measuring the vibration transmission in the shaker-clamp system using accelerometers, hardware and software to acquire and process the vibration signals. To evaluate tissue damage in normal operating conditions, films sensitive to pressure, developed by S.P.I. Inc. were used to know the pressure exerted on the tree's bark and its distribution. The radial admissible stress [$\sigma_{R\text{adm}}$] for the ages of trees considered was 2,068.2 kPa (300psi), the visible mechanical damage and at tissues level was 0% and the transmission of the vibration with the shaker-clamp system developed was higher than 80%.

Keywords: Coffee *Coffea arabica*, mechanical harvest, inertial trunk shakers, shaker-clamp system, mechanical damage, transmission of vibrations.

* Ingeniero Agrícola, Profesional Básico. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

** Investigador Principal I. Ingeniería Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

*** Profesor Titular. Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Antioquia, Colombia

**** Profesor Asistente. Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Antioquia, Colombia.

Las máquinas cosechadoras de frutos se utilizan en Estados Unidos y en Europa para disminuir los costos de la recolección de diversos productos, entre ellos, cítricos, olivos, cerezas, almendras y nueces. La fuerza requerida para vibrar los tallos se genera por la rotación de masas desbalanceadas accionadas por motores hidráulicos. El vibrador se acopla al tallo del árbol por medio de un dispositivo que permite transmitir eficientemente la vibración y evitar daños en su corteza.

Los principales problemas fisiológicos y fitosanitarios observados en la mecanización de las cosechas utilizando vibradores del tallo, los cuales representan importantes pérdidas económicas al cultivo, son la disminución de la productividad y la muerte prematura de los árboles (2).

De acuerdo con Ortiz (6), con la recolección mecánica de frutales ocurre mayor daño mecánico en los árboles que con la recolección manual, entre el 5% y el 20%. El daño mecánico en la cosecha mecanizada está asociado a factores agro-climáticos, factores humanos y factores de diseño (1, 3, 6).

En Cenicafé, desde 1996, se adelantan investigaciones en cosecha de café aplicando vibraciones al tallo, inerciales, circulares y multidireccionales. Los resultados obtenidos con los dispositivos evaluados (5, 7), indican que el principio de la vibración mecánica aplicada al tallo es muy promisorio para la cosecha mecanizada del café en Colombia, ya que permite obtener rendimientos altos si se compara con la recolección manual tradicional, obteniéndose buena calidad de la cosecha medida por la proporción de frutos maduros en la masa cosechada, cercana a la observada en la recolección manual tradicional.

Adicionalmente, por sus características técnicas (dimensiones, potencia, altura del centro de gravedad, peso, entre otras), la nueva

tecnología se podría utilizar en cafetales de alta densidad y en suelos húmedos, con pendiente de hasta un 60%. En los ensayos realizados por los autores mencionados se observó daño mecánico y muerte, por el ataque de *Ceratocystis fimbriata*, en alto porcentaje de los árboles vibrados (hasta el 81%). El diseño inadecuado del sistema de sujeción y el uso de materiales inapropiados fueron considerados los factores que más influyeron en la generación del daño mecánico.

El objetivo de la presente investigación fue diseñar un sistema de acople apropiado para los vibradores inerciales del tallo del café que transmita la vibración en forma eficiente sin ocasionar daño mecánico en la corteza de los árboles vibrados.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en Cenicafé, en la sede principal en Chinchiná. La evaluación de campo se desarrolló en la Estación Central Naranjal, ubicada en el municipio de Chinchiná (Caldas), con una altitud de 1.310m, temperatura promedio de 20,6°C y humedad relativa promedio del 75%. Los árboles de café seleccionados para este estudio fueron de la variedad Colombia, sembrados a 2m x 1m (2m entre calles 1m entre plantas) y un tallo por sitio, de primer ciclo (plantilla), frutos rojos, y de tercera, cuarta y quinta cosecha (48, 60 y 72 meses).

El experimento se dividió en dos etapas: 1) Determinación de los esfuerzos radiales admisibles en la corteza del cafeto, y 2) Evaluación de la transmisibilidad del sistema de acople diseñado y del daño mecánico ocasionado al tronco.

1. Determinación de los esfuerzos radiales admisibles en la corteza del cafeto. Los esfuerzos radiales $[\sigma_r]$, son los resultantes de

las cargas aplicadas en sentido radial al tallo del café. La relación que define este esfuerzo está dada por la ecuación:

$$\sigma_r = \frac{F}{A_s} \quad \ll 1 \gg$$

Donde:

σ_r : Esfuerzo radial resultante [Pa]

F: Fuerza de compresión aplicada en sentido radial [N].

A_s : Área sobre la cual actúa la fuerza F [m²].

Para determinar los esfuerzos radiales admisibles de la corteza del cafeto se utilizó una máquina universal de ensayos INSTRON 5569® y un dado de acero de 1cm² para aplicar la carga colocado en el bastidor de la máquina.

Las trozas utilizadas en los ensayos, de 50cm de longitud, se cortaron a 10cm de la

base del tronco. Inmediatamente se pintaron en sus extremos, se envolvieron en plástico para disminuir las pérdidas de humedad y se almacenaron a 5°C. Las trozas se cargaron en la dirección radial sobre una sección de corteza de 1cm² adherida al tallo (Figura 1).

En cada ensayo se obtuvo la gráfica de esfuerzo radial [σ_r] vs la relación de deformación [ϵ] para la corteza del cafeto.

El esfuerzo radial admisible se determinó considerando los cambios que ocurren cuando se rompe el citoplasma de las células y se liberan fenoles, y se originan tonalidades oscuras en las zonas sometidas a esfuerzos, identificables a simple vista. Con las observaciones microscópicas (microscopía óptica de trasluz), análisis histológico, se verificó la ocurrencia de daños al nivel de estructuras del tallo principalmente en el floema. Este método permitió establecer una escala de colores de oxidación de las secciones de corteza so-

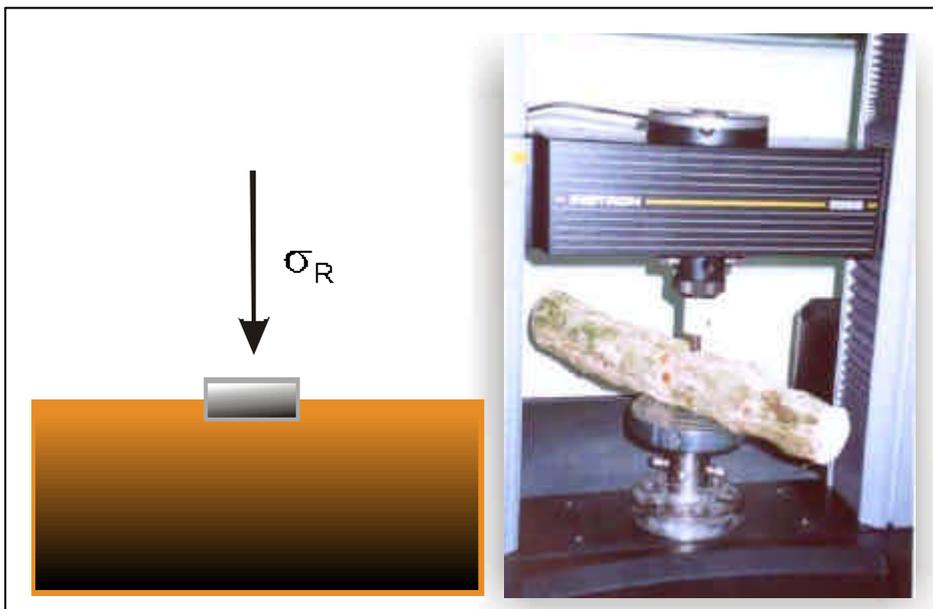


Figura 1. Determinación de los esfuerzos radiales admisibles en la corteza del árbol del café.

medidas a diferentes valores de esfuerzo radial. Las secciones de corteza obtenidas, para cada una de las edades de árboles consideradas, se sometieron a esfuerzos de 2.068,2kPa (300psi), 3.447kPa (500psi), 4.825,8kPa (700psi), 6.204,6kPa (900psi), 7.583,4kPa (1.100psi) y 10.341kPa (1.500psi). Las secciones de corteza sometidas a la carga se extrajeron y se permitió su oxidación; en cada una de ellas se buscó la huella dejada por el dado compresor. De cada una de las trozas también se obtuvo una sección de corteza no cargada, la cual se consideró como testigo (sin oxidación).

Se determinó el valor mínimo del esfuerzo radial en el cual se observó claramente la huella sobre las secciones cargadas y mediante el análisis histológico se verificó la ocurrencia de daño mecánico. Las secciones cargadas con valores iguales o superiores a este esfuerzo radial se consideraron afectadas por daño mecánico a niveles macro y micro.

Posteriormente, se analizaron histológicamente, a nivel micro, las secciones de corteza sometidas a esfuerzo radial inferior al determinado a nivel macro con el fin de establecer, al nivel de tejidos, el valor del esfuerzo radial que no produce daño mecánico en las estructuras del tallo del cafeto, el cual fue definido como *Esfuerzo radial admisible neto para la corteza del cafeto*.

2. Evaluación en campo de la transmisibilidad del sistema de acople y del daño mecánico.

En esta etapa se evaluó la eficiencia de transmisión de la vibración generada por el vibrador y suministrada a la planta a través del sistema de acople diseñado; además, se verificó si se presentaron daños en la corteza y los tejidos internos como consecuencia de la vibración. También, se corroboró si el esfuerzo radial aplicado [$\sigma_{\text{r aplic}}$], con el vibrador, era menor al esfuerzo radial admisible [$\sigma_{\text{r adm}}$], definido en la etapa anterior.

El equipo utilizado para evaluar el sistema de acople fue el *Vibrador Inercial de Tallos de Café «VITAC-1»* desarrollado en Cenicafé (Figura 2). El vibrador operó bajo las siguientes condiciones: presión de sujeción de 9.992,18kPa (1.450psi), frecuencia de vibración de 1.500cpm, excentricidad de las masas de 56,4mm, con un patrón de vibración de 10 lazos (relación de velocidades 7:3), el punto de aplicación de la vibración en el tallo se localizó a 40cm sobre el suelo durante 10 segundos.

Para el diseño del sistema de acople del vibrador inercial multidireccional *VITAC-1* se tuvo en cuenta la información registrada en la literatura consultada, las experiencias adquiridas en trabajos con vibradores inerciales de tallo desarrollados en Cenicafé, las recomendaciones de profesionales con experiencia en el diseño de sujetadores de tallo, el estudio de diversos materiales como el caucho y el análisis estático y dinámico a los prototipos vibratorios anteriormente desarrollados en Cenicafé.

Se seleccionó la forma cilíndrica para el sistema de acople por ser más económica que la prismática, fácil de construir, y por su facilidad para ser instalada en el vibrador.



Figura 2. Vibrador multidireccional de tallos de café «VITAC-1» desarrollado en Cenicafé en 2001.

El sistema de acople se diseñó con dos elementos: uno móvil, accionado por medio de un cilindro hidráulico, y otro fijo, soldado a la estructura del vibrador. Cada elemento está compuesto por un cilindro de caucho de dureza 55° Shore A, de 100mm de diámetro y 200mm de longitud ensamblado sobre un eje de acero calibrado 1020 de 25,4 mm de diámetro. En cada rodillo de caucho se colocó un par de bandas o faldones elaborados en caucho espumado de dureza 30° Shore A, con nervadura de lona, de 350mm de longitud, 220mm de ancho y 10mm de espesor. Con el empleo de los faldones del material mencionado se buscó evitar daños en la corteza del cafeto en la zona de acople por el efecto de esfuerzos tangenciales que se generan durante la vibración. La función de los rodillos de caucho (tacos) es transmitir las cargas generadas en sentido radial a los faldones.

En el dimensionamiento del sistema de acople se tuvieron en cuenta dos factores: las dimensiones de la cabeza vibradora y el diámetro medio de los tallos de café a vibrar. Se utilizó la ecuación obtenida por Aristizábal¹, para la variedad Colombia roja, ($Y = 55,1136 - 0,2354 X$), que relaciona el diámetro del tallo Y [mm], con la altura del tallo medida

desde el suelo X [cm]), obteniendo, a 40cm del suelo un valor de 4,6cm de diámetro del tallo (distancia mínima entre bordes internos de los rodillos de caucho). Por facilidades de construcción, la distancia entre los tacos cilíndricos de caucho se ajustó a 5,0cm, permitiendo ampliaciones, si fueran necesarias. Con esta distancia se buscó asegurar suficiente área de contacto entre los faldones de caucho y el tallo del café para disminuir la magnitud de los esfuerzos radiales aplicados en la sujeción y durante la vibración.

El caucho utilizado en la fabricación de los faldones, combinación de caucho sintético y nitrilo, es resistente al contacto con hidrocarburos, a la intemperie y a las cargas dinámicas. En la Figura 3 se muestra el sistema de acople diseñado.

Para evaluar la transmisión de la vibración se seleccionaron 5 árboles de cada una de las edades establecidas (48, 60 y 72 meses), y se registraron las señales de vibración de entrada con un acelerómetro biaxial de $\pm 100g$ (previamente calibrado), colocado sobre el sistema de acople; y para el registro de las señales de salida, se ubicó un acelerómetro triaxial de $\pm 100g$, sobre el tallo del árbol a



Figura 3.
Vista general del sistema de acople diseñado para el «VITAC-1».

¹ ARISTIZÁBAL T., I.D.; Estudio del efecto de la vibración del árbol de café en la selectividad de la cosecha. Chinchiná, Cenicafé, 1998. 42p. (Experimento ING-0105, Informe final).

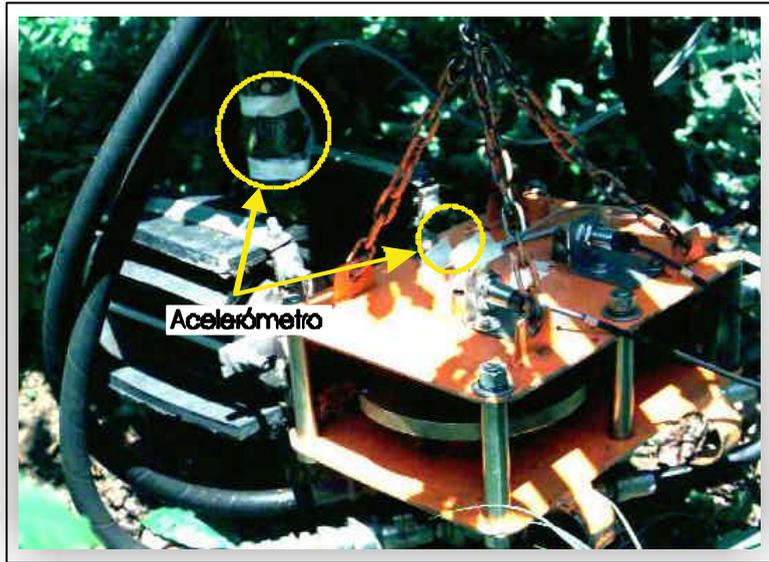


Figura 4. Ubicación de acelerómetros para medir la transmisión de la vibración.

40cm de altura sobre el suelo, como se muestra en la Figura 4.

La eficiencia de transmisión (E.T.) en porcentaje, se definió como:

$$E.T. (\%) = \frac{\text{Energía saliente}}{\text{Energía entrante}} \quad \ll 2 \gg$$

Las señales de energía de entrada y salida de los acelerómetros se registraron en un computador a una frecuencia de muestreo de 5.000 datos por segundo, durante un tiempo máximo de adquisición de 10 segundos. Para el análisis de las señales se utilizó un programa en MATLAB® desarrollado por Duque y Henao², en Cenicafé, el cual permitió medir la disipación de energía que ocurre entre la fuente generadora (el vibrador), y el medio receptor (el tallo del árbol).

Con los valores de E.T. se estimó, para cada edad de árbol, el promedio y el intervalo

de confianza al 95%. Como criterio para definir si el sistema de acople transmitía eficientemente las vibraciones se estableció que el límite inferior del intervalo estimado debía ser mayor o igual al 80%.

Evaluación del daño mecánico en condiciones estáticas (sujeción del sistema de acople al árbol). Con el fin de detectar la ocurrencia de posibles lesiones en la corteza de los árboles vibrados se compararon los valores de esfuerzo radial aplicado (estáticamente) $[\sigma_{\text{Ráplic}}]$ y el admisible $[\sigma_{\text{R adm}}]$ determinado en la primera etapa. Adicionalmente, se verificó si se presentaban lesiones visibles en los árboles.

Para obtener el esfuerzo radial aplicado al tronco por el sistema de sujeción $[\sigma_{\text{Ráplic}}]$, según la ecuación 1, se requiere conocer la fuerza de acople y del área de contacto entre los faldones de caucho y el tallo del cafeto. Para la estimación de la fuerza se realizó un análisis de cuerpo libre del elemento móvil,

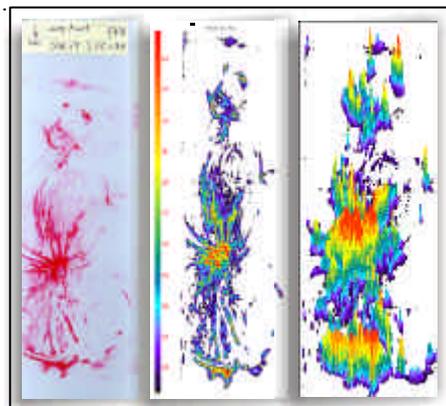
² DUQUEA., J. & HENAOS., J.A.; Programa para el análisis de señales de aceleración desarrollado en *MatLab*®. Chinchiná, Cenicafé. 2001. (Comunicación Personal).

el cual permitió obtener una expresión que relaciona la fuerza de acople (en el árbol), en función de la presión del cilindro hidráulico. Para calcular el área de contacto entre los faldones de caucho y el tallo se utilizó la técnica de procesamiento de imágenes. En cada uno de los árboles utilizados en las pruebas de transmisibilidad, se impregnó la corteza en la zona de acople con una película de aceite de motor usado (SAE 40W). Luego se insertó una hoja de papel entre el acople y el tallo con el fin de marcar el área de contacto sobre la hoja, se sujetó el tallo durante 10s y se retiró la hoja. Finalmente, se digitalizó la imagen y se utilizó un algoritmo desarrollado en *Matlab*®, por Gómez³, en Cenicafé, para obtener el área de contacto [m²], entre el acoplador y el tallo del cafeto. Con la información obtenida del esfuerzo radial aplicado [$\sigma_{R\text{ aplic}}$], (en condiciones estáticas), para cada edad, se estimó el promedio y el intervalo de confianza al 95%. Si el valor del límite superior del intervalo era menor (descriptivamente), que el valor del esfuerzo radial admisible determinado en la primera etapa, se consideró que el sistema de acople cumple con el propósito para el cual fue diseñado.

Evaluación del daño mecánico bajo condiciones dinámicas (vibración). Se utilizó el sistema *Topaq Analysis System*® de *Sensor Products Inc.*, para determinar la magnitud y la distribución de las presiones en el área de acople durante la vibración. El sistema *Topaq*® consta de escáner, software y películas reveladoras de presión (*Superlow* para este caso). Se tomaron 4 árboles para cada una de las edades (48, 60 y 72 meses) y en cada uno se insertó una banda entre el tallo y los faldones de caucho del sistema de acople. Se vibró el árbol durante 10 segundos y luego se retiraron las bandas. En cada banda se delimitó un cuadro de aproximadamente 3cm² (área representativa de contacto entre el sistema de acople y el tallo del cafeto) y se definió una línea paralela al eje del tallo, con el fin de obtener el correspondiente perfil de presiones.

Las bandas se revelaron en los laboratorios de *Sensor Product Ind*, en Estados Unidos, obteniéndose el mapa de la distribución de las presiones del área de contacto en 2D y 3D, el perfil de presiones de la línea dibujada, un histograma de frecuencias relativas

Figura 5.
Película sin procesar y
procesada mediante el *Topaq*
Analysis System®



³ GÓMEZ G., E.O. Medición de áreas de contacto mediante el uso de la técnica de procesamiento de imágenes. Chinchiná, Cenicafé. 2001 (Comunicación personal).

y la estadística básica de la región encerrada (área representativa de contacto). A partir del análisis de las bandas de presión se calculó el promedio, la mediana y la moda para cada una de las áreas representativas de contacto, así como el percentil 99 y el porcentaje de área con presiones que superaron el esfuerzo radial admisible $[\sigma_{Radm}]$, definido en la primera etapa. En la Figura 5 se muestra una película sin procesar, procesada en 2D y 3D con el *Topaq Analysis System*®.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Determinación de los esfuerzos radiales admisibles en la corteza del café. Como se presenta en la Figura 6, las curvas esfuerzo radial $[\sigma_R]$ vs relación de deformación $[\epsilon]$ para la corteza del café, para cada una de las edades estudiadas (48, 60 y 72 meses), presentan tendencia similar. En cada una se identificaron tres zonas:

Zona A: en la cual ocurren grandes deformaciones con cargas relativamente bajas; posiblemente en esta etapa se comprime la primera capa de la corteza, la cual se caracteriza por presentar tejido lignificado (tejido inerte de tipo corchoso, con gran cantidad de macroporos llenos de aire).

Zona B: Etapa con mayor rigidez que la anterior; en ella se inicia la compresión de los tejidos del floema y del xilema. El comportamiento se asemeja a lineal, hasta alcanzar el punto de falla (límite con la Zona C).

Zona C: en la cual se presenta el punto de falla de la corteza, caracterizado por un cambio brusco de pendiente de la curva. Una vez alcanzado el punto de falla ocurre incremento del esfuerzo radial $[\sigma_R]$, a medida que la relación de deformación $[\epsilon]$ aumenta, el cual se debe a que se comienza a cargar el tallo del café propiamente dicho. En la Figura 6 se muestra una curva esfuerzo radial $[\sigma_R]$ vs relación de deformación $[\epsilon]$, con las zonas especificadas anteriormente.

El método de la escala de colores de oxidación, similar al empleado por Fridley *et al.* (4), se utilizó como primer indicativo para determinar el esfuerzo radial admisible $[\sigma_{Radm}]$ en la corteza del café.

La escala de colores de oxidación para las secciones sometidas a diferentes valores de esfuerzos radiales, fue similar para las tres edades estudiadas (Figura 7). Para 2.068,2kPa (300psi), y para 3.447kPa (500psi), no se notó la huella dejada por el dado de acero en las secciones cargadas. Para 4.825,8ka

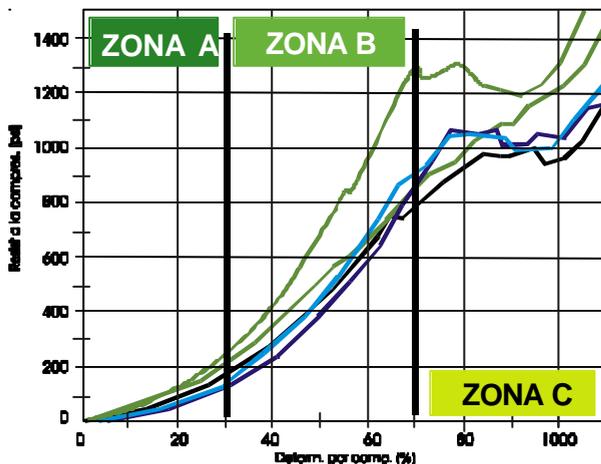


Figura 6. Curvas de esfuerzo radial [psi] vs. relación de deformación [%] para la corteza del café, obtenidas en ensayos a compresión.

(700psi), la huella dejada por el dado compresor fue muy tenue. En cambio, para las secciones cargadas a 6.204,6kPa (900psi), 7.583,4kPa (1.100psi) y 10.341kPa (1.500psi), se notó claramente la huella dejada por el dado.

Las secciones de corteza cargadas a 6.204,06kPa (900psi), que presentaron la huella dejada por el dado cargador se sometieron a análisis de tejidos. Se observó que a ese valor de esfuerzo se presenta daño mecánico en los tejidos internos de la corteza.

Figura 7. Escala de colores de oxidación para secciones de corteza del café (izquierda), sometidas a diferentes valores de esfuerzo radial. (a) 2.068,2kPa (300psi); (b) 3.447kPa (500psi); (c) 4.825, (700psi); (d) 6.204,06kPa (900psi); (e) 7.583,4kPa (1.100psi); (f) 10.341kPa (1.500psi), en comparación con el testigo (derecha).

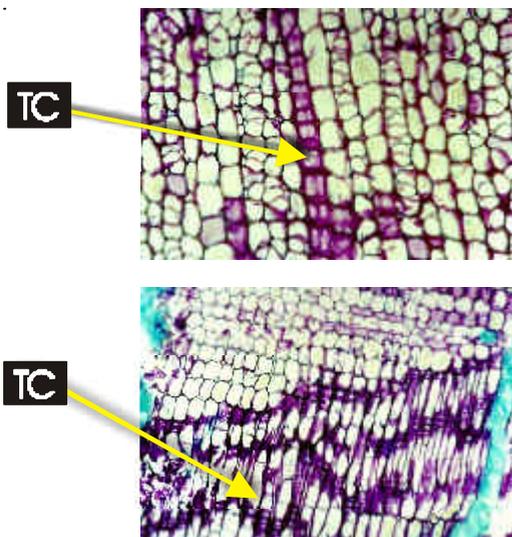
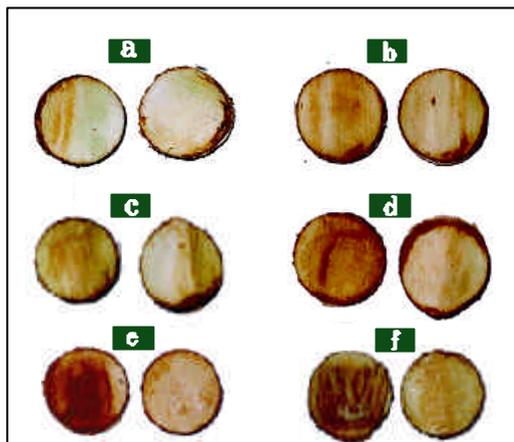


Figura 8. Corte transversal de sección de corteza: (a) Tejido sano y (b) Tejido cargado a 6204,06kPa (900psi), con daños en los tubos cribosos (tc). Aumento 40x.

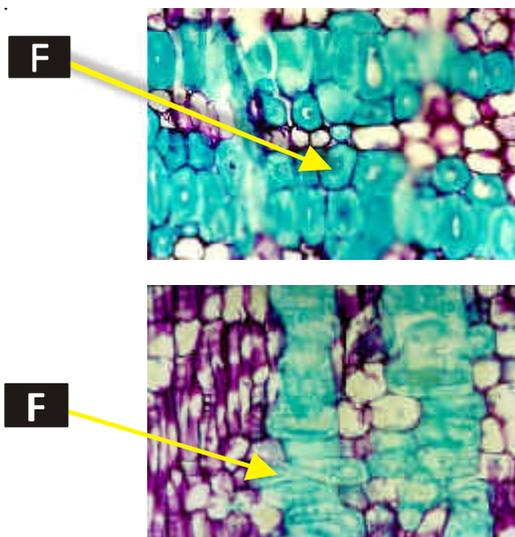


Figura 9. Corte transversal de una sección de corteza: (a) Tejido sano y (b) Tejido cargado a 6.204,06kPa (900psi) con daños en el floema (F). Aumento 40x.

Figura 8 se muestra tejido sano y tejido con daño mecánico en los tubos cribosos, debido al efecto de la carga.

En la Figura 9 se muestra tejido sano y tejido con daño mecánico a nivel del floema para la misma sección, caracterizado por un aplastamiento de estas células. Se observa la simetría que presentan estas células en comparación con el tejido cargado cuyas células son de forma rectangular.

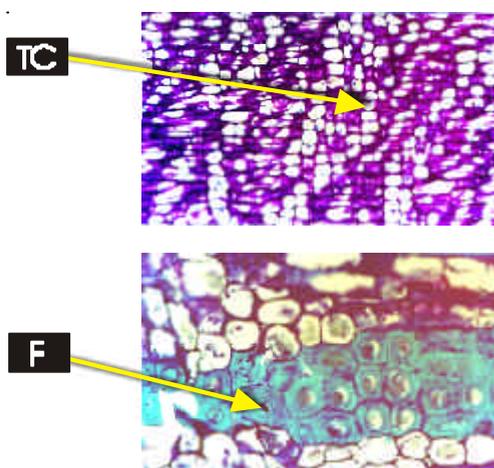


Figura 10. Cortet transversal de una sección de corteza cargada a 2.060,2kPa (300psi): tubos cribosos (a) y floema (b). Aumento 40x.

En las secciones de corteza cargadas a 5.515,2kPa (800psi), a 4.136,4kPa (600psi), y 3.447kPa (500psi), también se observó daño mecánico a este mismo nivel (tubos cribosos y floema). En la sección de corteza cargada a 2.068,2kPa (300psi) (Figura 10), no se notó daño mecánico al nivel de tejidos. En el floema, las células presentan la misma configuración observada en un tejido sano. En los tubos cribosos se observó ordenamiento lineal similar al del tejido sano.

A este valor de esfuerzo radial no se observaron oxidaciones anormales en ninguna de las secciones de corteza obtenidas de ensayos realizados en laboratorio; por tanto, para cada una de las edades estudiadas (48, 60 y 72 meses), el esfuerzo radial admisible neto para la corteza de cafeto fue definido en 2.060,2kPa (300psi).

2. Evaluación en campo de la eficiencia de transmisión de vibraciones del sistema de acople y del daño mecánico. El límite inferior del intervalo de confianza a un nivel del 95% para la variable eficiencia de transmisión de la vibración para árboles de tercera cosecha (48 meses), fue 85%, para árboles de cuarta cosecha (60 meses) 80% y para árboles de quinta cosecha (72 meses) 79%. Teniendo en cuenta los valores anteriores y el promedio (88%), para las tres edades

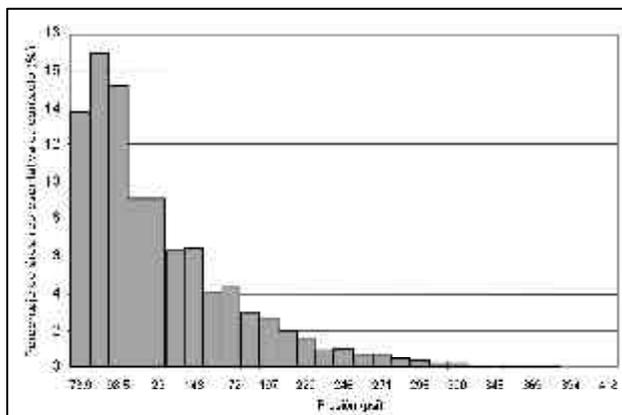


Figura 11. Distribución de la presión desarrollada en la zona de contacto en condiciones normales de operación del equipo

estudiadas se consideró que el diseño es apropiado.

En la Tabla 1 se resumen los intervalos de confianza al 95% para la variable eficiencia de transmisión de la vibración (E.T.), obtenidos para cada una de las edades estudiadas.

Evaluación del daño mecánico en condiciones estáticas (sujeción del sistema de acople al árbol). Mediante un diagrama de cuerpo libre del elemento móvil del sistema de sujeción se obtuvo la siguiente ecuación que relaciona el esfuerzo radial aplicado $[\sigma_{R\text{aplic}}]$ (en condiciones estáticas), con la presión del cilindro hidráulico $[P_c]$, y el área de contacto $[A_R]$, determinada mediante el procesamiento de imágenes.

$$\sigma_{R\text{aplic}} = \frac{29,44 \cdot P_c}{A_R} \quad \langle\langle 3 \rangle\rangle$$

Donde: $[\sigma_{R\text{aplic}}]$ kPa, $[P_c]$ psi, $[A_R]$ cm²

Con la ecuación 3, se determinó el esfuerzo radial aplicado para cada una de las edades estudiadas. Para tercera cosecha (48 meses), el límite superior del intervalo de confianza a un nivel del 95% para la variable esfuerzo radial aplicado fue de 881,26kPa (127,83psi), para cuarta cosecha (60 meses) 756,40kPa (109,71psi), y para árboles de quinta cosecha (72 meses) 684,68kPa (99,30psi). El mayor esfuerzo radial aplicado $[\sigma_{R\text{aplic}}]$, se obtuvo en árboles de tercera cosecha y el

menor valor se presentó en árboles de quinta cosecha; debido a que los árboles de tercera cosecha poseen menor diámetro que los árboles de cuarta y quinta cosecha, respectivamente.

Teniendo en cuenta que el mayor valor de esfuerzo radial aplicado para árboles de tercera cosecha (881,26kPa; 127,83psi), es notoriamente inferior al admisible (2.068,2kPa; 300psi), no se espera ocasionar daño mecánico interno en las estructuras del tallo (en floema, y tubos cribosos).

En la Tabla 2 se resumen los intervalos de confianza al 95% para la variable esfuerzo radial aplicado, obtenidos para cada una de las edades estudiadas.

2. Evaluación del daño mecánico bajo condiciones dinámicas (vibración). Con el sistema Topaq Analysis System® se obtuvo el mapa de presiones para cada una de las edades estudiadas, además de la información antes descrita.

De la información presentada en la Figura 11 se tiene que los mayores porcentajes de área representativa de contacto están entre 509,46kPa (73,9psi) y 847,96kPa (123psi), es decir, la mayoría del área de contacto de la región demarcada (o área representativa de contacto) está sometida a un esfuerzo inferior al radial admisible $[\sigma_{R\text{adm}}]$ obtenido para la corteza del café. De acuerdo a lo anterior, no se espera ocasionar daño mecánico a las estructuras internas del tallo del café.

Tabla 1. Intervalos de confianza al 95% en árboles de café variedad Colombia para la variable eficiencia de transmisión de la vibración (E.T.) en tres edades.

Edad		Límite inferior	Media	Límite superior
Cosecha	Meses			
3 ^a	48	85%	91%	98%
4 ^a	60	80%	83%	86%
5 ^a	72	79%	88%	97%

En la Tabla 3 se muestran las medidas de tendencia central, el percentil 99 y el porcentaje del área crítica (porcentaje de área mayor a 2.068,2kPa; 300psi), obtenidas para las presiones de contacto en cada una de las edades evaluadas (46, 60 y 72 meses). Para todas las edades estudiadas, la moda (el dato que más se repite), y la mediana (el 50% de la población), siempre fueron inferiores a la media y en ninguna de las tres medidas de tendencia central se superó el límite del esfuerzo radial admisible [σ_{Radm}] de la corteza del cafeto obtenido en esta investigación. Analizando el percentil 99 (el 99% de la población que se encuentra inferior al valor dado), se presentaron varios árboles en los cuales se superó el esfuerzo radial admisible [σ_{Radm}]. Esto, posiblemente se debió a que las áreas representativas de contacto seleccionadas

alcanzaron a estar en zonas de alta presión ocasionadas por las protuberancias dejadas por las ramas eliminadas, verificado en el perfil de presiones de las imágenes. Las protuberancias son zonas sin corteza, bastante densas y lignificadas (es el punto de anclaje de la rama al tallo), por esta razón no fueron consideradas para análisis en este estudio. Los mayores valores de área crítica (área con un esfuerzo superior al admisible), se dieron tan solo en dos ensayos en el árbol 3 de cuarta cosecha (4 -3), y en el árbol 3 de quinta cosecha (5-3). En general, el método de la escala de colores es una herramienta útil para establecer, a nivel macro, la ocurrencia de daño mecánico en los tejidos de la corteza del tallo del cafeto. Los estudios histológicos, a nivel micro, permiten identificar las estructuras afectadas y la extensión de los daños oca-

Tabla 2. Intervalos de confianza al 95% para la variable Esfuerzo radial aplicado [s_{Raplic}] en condiciones estáticas para árboles de tercera, cuarta y quinta cosecha

Cosecha	Edad		Límite superior		Media		Límite inferior	
	Meses		psi	kPa	psi	KPa	Psi	kPa
3 ^a	48		127,8	881,4	108,5	748,1	89,2	614,8
4 ^a	60		109,7	756,4	99,02	682,7	88,3	609,1
5 ^a	72		99,3	684,7	86,89	599,1	74,5	513,5

Tabla 3. Medidas de tendencia central, percentil 99 y área crítica para cada una de las áreas representativas de contacto por edad.

Cosecha- árbol	Mediana (kPa)	Media (kPa)	Moda (kPa)	Percentil 99 (kPa)	% Área crítica
3-1	651,1	803,6	594,3	1861,4	0,4
3-2	749,7	908,4	679,1	2035,8	0,9
3-3	697,0	886,3	594,3	2290,3	1,7
3-4	725,5	809,2	594,3	1527,10	0,00
4-1	659,3	789,7	594,3	1527,10	0,00
4-2	1018,3	1113,4	679,2	2459,9	3,7
4-3	848,7	1070,8	594,3	2799,0	10,8
4-4	1317,4	1311	1272,7	2629,4	7,3
5-1	1018,3	1125,9	679,1	2459,9	6,00
5-2	957,6	1112,6	679,1	2714,2	8,3
5-3	1187,9	1287,4	679,1	2883,8	18,2
5-4	658,9	773,4	509,5	1611,9	0,00

sionados. En las edades estudiadas, para un esfuerzo radial de sujeción de 2068,2 kPa (300 psi), no se presentó daño mecánico en las estructuras internas de la corteza del árbol del café; por tanto, este valor se recomienda como esfuerzo radial admisible $[\sigma_{Radm}]$ para la corteza del cafeto de la variedad Colombia.

Con el sistema de acople diseñado, en el cual se utilizan bandas de caucho deslizantes para evitar la transmisión de esfuerzos tangenciales a la corteza y rodillos de caucho para transmitir las fuerzas generadas, no se ocasionan daños en la corteza de árboles de café variedad Colombia de 3ª, 4ª y 5ª cosecha, en la zona de acople del vibrador inercial. En condiciones normales de operación en campo, con el sistema de acople diseñado se transmite por lo menos el 80% de las fuerzas generadas durante la vibración, en cada una de las edades estudiadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín y a COLCIENCIAS

A la Lic. Gloria Camayo V., al Ing. Juan Carlos Vélez Z., al Dr. Jaime Arcila, a la Dra. Esther C. Montoya R., al personal de la Estación Central Naranjal y a la disciplina y al personal del taller de Ingeniería Agrícola de Cenicafé.

LITERATURA CITADA

1. ADRIAN, P.A.; FRIDLEY, R.B. Shaker-clamp design as related allowable stresses of the tree bark. Transactions of the ASAE 7(3):232-237. 1964.
2. BROWN, G.K.; RAUCH, M.H.; TIMM, E.J. Improved clamp pad for trunk shakers. Transactions of the ASAE 31(3): 677-682. 1988.
3. CARGILL, B.F.; BROWN, G.K.; BUKOVAC, M.J.; Factors affecting bark damage to cherry trees by harvesting machines. Michigan, Cooperative Extension Service, 1982. p. 1-6. (Agricultural Engineering Information Series N° 471, File N° 18446).
4. FRIDLEY, R.B.; BROWN, G.K.; ADRIAN, P.A.; Strength characteristics of fruit tree bark. Hilgardia 40(8): 205-222. 1970.
5. GRANJAF., J.J. Diseño, construcción y evaluación de un dispositivo para la cosecha mecánica del café, por vibración multidireccional al tallo. Chinchiná, Cenicafé, 2000.
6. ORTIZ C., J.; Técnica de la mecanización agraria. 3. ed. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 1989. 641 p.
7. RAMÍREZ V., C.M.; Desarrollo y evaluación de un cosechador de café por aplicación de vibraciones circulares al tallo. Medellín, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 1999. 131 p. (Tesis: Ingeniero Agrícola).